

минается в регистре R_{Γ} , который управляет работой коммутатора Ком, направляющего сигналы U_{γ} управления к клапанам пневматической схемы ВСТ. В зависимости от номера режима сигналы $U_{K1} \dots U_{K6}$ управляют состоянием клапанов в соответствии с таблицей 1. В схеме предусмотрена тактовая частота опроса регистра с периодом t_0 , большая или равная значению времени переходного процесса в рабочем отсеке. Таким образом, если заслонка оказывается в закрытом состоянии, то ее положение будет зафиксировано в течение всего цикла заполнения счетчика.

Если температура в отсеке находится в пределах нормы, то состояние схемы управления фиксируются, так как на выходах компараторов не формируются сигналы $U_{\langle 1 \rangle}$. Переполнение счетчика вследствие роста температуры в отсеке соответствует переходу в нулевой режим, что означает закрытие заслонки воздухозаборника.

Рассмотренная схема управления режимами ВСТ является простой и эффективной при невысоких требованиях к точности поддержания заданной температуры, так как при резких изменениях параметров полета ЛА суммарные задержки в схеме могут привести к кратковременному выходу температуры за пределы установленных допусков.

Многоступенчатая ВСТ с системой автоматического выбора режима работы существенно, в 1,5...3 раза, расширяет диапазон работы ВСТ по высотам и скоростям полета ЛА с заданной точностью термостатирования рабочих отсеков, в которых устанавливается прецизионная информационно-измерительная аппаратура, вычислительное и радиотехническое оборудование.

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ШУГООБРАЗНЫХ КРИОГЕННЫХ ТОПЛИВ

Арсланова С.Н.

Казанский государственный технический университет, г. Казань

Свойства топлива в значительной мере определяют конструкцию, экономичность эксплуатации и экологические характеристики различных видов транспорта. При использовании альтернативных топлив на основе сжиженного водорода (ЖВ) и сжиженного природного газа (СПГ) возникает ряд проблем, связанных с низкой плотностью таких топлив и существенными потерями при испарении за счет внешнего теплопритока.

Характеристики систем хранения, передачи и использования криогенных топлив можно существенно улучшить, если перевести топливо в

частично отверженное (шугообразное) состояние.

Процессы получения шугообразного топлива относятся к проблемам энергетики и не имеют непосредственного отношения к транспорту, но они существенно влияют на экономические показатели, в частности, на себестоимость перевозок. Экономическая оценка любой системы должна производиться на основе приведенных затрат. Приведенные затраты в энергетических системах непосредственно связаны с их термодинамическими характеристиками, и технико-экономический оптимум близок к термодинамическому [1].

Получение шугообразных криогенных топлив возможно посредством внешнего и внутреннего охлаждения. Использование внешнего охлаждения требует применения дорогостоящего оборудования и оправданно при больших объемах производства. Внутреннее охлаждение обычно проще в технической реализации. Наиболее распространено получение шугообразных продуктов в емкости вакуумированием парового пространства над жидкостью и барботирование инертным газом с низкой критической температурой [1]. Термодинамический анализ диаграммы состояния нормального вещества показывает, что получить шугообразное топливо можно путем дросселирования и адиабатного расширения жидкости [2, 3, 4].

Структура получаемой шуги в значительной степени зависит от процесса получения. При откачке с малой скоростью образуются большие гладкие куски, при высокой скорости откачки твердая фаза представляет собой пористый твердый слой. Барботирование газом требует дробления полученной твердой фазы. Дросселирование и адиабатное расширение дают достаточно мелкие твердые частицы и позволяют организовать поточный процесс.

Выбор наиболее рационального способа получения шугообразного топлива должен быть сделан на основе расчета материальных и энергетических затрат, а также на основе сравнения эксплуатационных качеств получаемого продукта.

Анализ эффективности различных процессов получения шугообразных топлив удобно проводить с помощью эксергетического метода, позволяющего оценивать потоки всех видов энергии и вещества посредством единого критерия - эксергии. Если рассматривать идеализированный процесс, в котором потери, связанные с несовершенством оборудования сведены к нулю, то такая модель позволит определить предел термодинамического совершенствования.

Эксергетический коэффициент полезного действия процесса определяется отношением суммарной эксергии полезного эффекта к затратам на его получение

$$\eta_e = \frac{\sum E_3}{\sum E_3}.$$

Полезным эффектом в данном случае является поток шуги заданного состава при температуре и давлении в тройной точке, а затратами - суммарная эксергия дополнительных веществ и энергия, подводимая в форме работы. Задача расчета заключается в определении выхода шуги с заданным содержанием твердой фазы из нормально кипящей жидкости и затрат работы и дополнительных веществ для осуществления процесса.

Процесс получения шуги откачкой состоит из двух стадий - охлаждение жидкости до температуры тройной точки и замораживание части жидкости. Для первой стадии

$$Mc_s dT = r dM,$$

где M - исходная масса жидкости, c_s - теплоемкость жидкости на линии насыщения, r - скрытая теплота парообразования, T - температура. Для второй стадии

$$(M - \Delta M_1 - \Delta M_2)\lambda_{\tau\tau} = \Delta M_2 r_{\tau\tau},$$

где ΔM_1 - количество газа, откачанное на первой стадии, ΔM_2 - количество газа, откачанное на второй стадии, $r_{\tau\tau}$ и $\lambda_{\tau\tau}$ скрытая теплота парообразования и скрытая теплота плавления при температуре тройной точки. Если содержание твердой фазы в шуге $\beta = M_r/(M_r + M_{ж})$, а выход шуги $\gamma = M_{ш}/M$, то,

$$\gamma = \frac{(M - \Delta M_1)r_{\tau\tau}}{M(r_{\tau\tau} + \beta\lambda_{\tau\tau})}.$$

При дросселировании охлаждение жидкости происходит непрерывно, и при входе линии процесса в область трехфазных состояний изотэнтальный процесс становится еще и изобарно-изотермическим. Выход шуги

$$\gamma = 1 - \frac{h - h'_{\tau\tau} + \beta\lambda_{\tau\tau}}{r_{\tau\tau} + \beta\lambda_{\tau\tau}},$$

где h - энтальпия исходной нормально кипящей жидкости, $h'_{\tau\tau}$ - энтальпия жидкости в тройной точке.

Аналогичным образом при адиабатном расширении

$$\gamma = 1 - \frac{(s - s'_{\tau\tau}) + \beta \frac{\lambda_{\tau\tau}}{T_{\tau\tau}}}{\frac{r_{\tau\tau}}{T_{\tau\tau}} + \beta \frac{\lambda_{\tau\tau}}{T_{\tau\tau}}},$$

где s - энтропия нормально кипящей жидкости, $s'_{\tau\tau}$ - энтропия жидкости в тройной точке.

Для барботирования можно использовать только те газы, критическая температура которых ниже, чем у данного вещества. В случае охлаж-

дения метана это может быть азот; для водорода пригоден лишь гелий.

При барботировании в емкость подается охлажденный газ при нормальном атмосферном давлении и температуре жидкости в тройной точке. Количество жидкости, испарившейся при охлаждении до температуры в тройной точке [5]

$$\Delta M_1 = \frac{M \bar{c}'|_{T_{\text{тр}}}^T (T - T_{\text{тр}})}{\bar{r}|_{T_{\text{тр}}}^T},$$

где \bar{c}' - средняя теплоемкость жидкости, \bar{r} - средняя скрытая теплота парообразования. Масса барботируемого газа

$$M_{61} = \Delta M_1 \frac{R}{R_6} \frac{p - p_s(T_{\text{тр}})}{p_s(T_{\text{тр}})},$$

где R_6 - газовая постоянная барботируемого газа, R - газовая постоянная охлаждаемого вещества, $p_s(T_{\text{тр}})$ - давление насыщения при температуре тройной точки.

Масса жидкости, испарившейся при частичном замораживании,

$$\Delta M_2 = \frac{(M - \Delta M_1) \beta \lambda_{\text{тр}}}{r_{\text{тр}} + \beta \lambda_{\text{тр}}}.$$

Количество барботируемого газа $M_{62} = \Delta M_2 \frac{R}{R_6} \frac{p - p_s(T_{\text{тр}})}{p_s(T_{\text{тр}})},$

суммарное количество барботируемого газа $M_6 = M_{61} + M_{62}.$

Выход шуги $\gamma = (M - \Delta M_1 - \Delta M_2)/M.$

Для получения шуги метана и водорода откачкой, адиабатным расширением и дросселированием жидкости необходимо поддержание давления ниже атмосферного. Эксергетический КПД определится соотношением

$$\eta_e = \frac{\gamma e_s}{e_1 + (1 - \gamma) I_{\text{вн}}},$$

где e_1 - удельная эксергия нормально кипящей жидкости,

$e_s = (1 - \beta) e_{\text{лт}} - \beta e_{\text{тр}}^T$ - удельная эксергия шуги с содержанием твердой фазы β , $e_{\text{лт}}$ и $e_{\text{тр}}^T$ - удельные эксергии жидкой и твердой фаз при температуре тройной точки, $I_{\text{вн}}$ - удельная работа вакуумнасоса.

Эксергия вещества в заданном состоянии $e = (h - h_{\text{oc}}) - T_{\text{oc}}(s - s_{\text{oc}})$, где T_{oc} - температура окружающей среды, h_{oc} и s_{oc} - энтальпия и энтропия в состоянии равновесия с окружающей средой, h и s - энтальпия и энтропия в заданном состоянии. Метан и водород в состоянии равновесия с окружающей средой являются газами.

При получении шуги барботированием в затраченную эксергию

войдет химическая эксергия барботируемого газа. Эксергетический КПД процесса барботирования

$$\eta_e = \frac{\gamma e_s}{e_1 + M_6(e_6 + e_0)},$$

где e_6 , e_0 - физическая и химическая эксергия барботируемого газа, M_6 - количество газа, затраченное на получение γ кг шуги заданного состава из 1 кг жидкости.

Для обеспечения процессов откачки, адиабатного расширения и дросселирования необходимы вакуумные насосы большой объемной производительности. Рациональнее использовать эжекторы. Проблема заключается в нахождении подходящего источника сжатого газа для эжектора. В случае получения шугообразного топлива на основе природного газа таким источником может быть газ высокого давления из магистрального газопровода. При редуцировании газа на газораспределительных станциях его потенциальная энергия безвозвратно теряется. Использование ее для получения шугообразного топлива позволит частично решить проблему утилизации энергии. Эксергетический КПД процессов получения шуги адиабатным расширением и дросселированием с использованием эжектора

$$\eta_e = \frac{\gamma e_s}{e_1 + (1 - \gamma)e_{эж} / u},$$

где $e_{эж}$ - удельная эксергия эжектирующего (высоконапорного) газа, $u = G_H / G_B$ - коэффициент эжекции, G_H и G_B - расходы низконапорного и высоконапорного газов. При использовании эжектора в процессе получения шуги откачкой

$$\eta_e = \frac{\gamma e_s}{e_1 + e_{эж} G_a},$$

где G_a - общее количество высоконапорного газа, затраченное на получение γ кг шуги заданного состава из 1 кг жидкости.

Так как в составе СПГ до 98 % метана, расчет эксергетического КПД проведен для чистого метана. Топливо на основе ЖВ считалось чистым параводородом. За исходное состояние принято состояние нормально кипящей жидкости. Параметры окружающей среды $p_{oc} = 0,1$ МПа, $T_{oc} = 290$ К. Параметры высоконапорного газа для эжектора $p_a = 30$ МПа, $T_a = 290$ К, давление смешанного потока и давление сжатого потока после вакуумнасоса $p_2 = p_c = 0,15$ МПа.

На рис.1 показаны результаты расчетов выхода метановой шуги различного состава и эксергетического КПД различных процессов при использовании механических вакуумнасосов и эжекторов. Барботирование осуществлялось азотом.

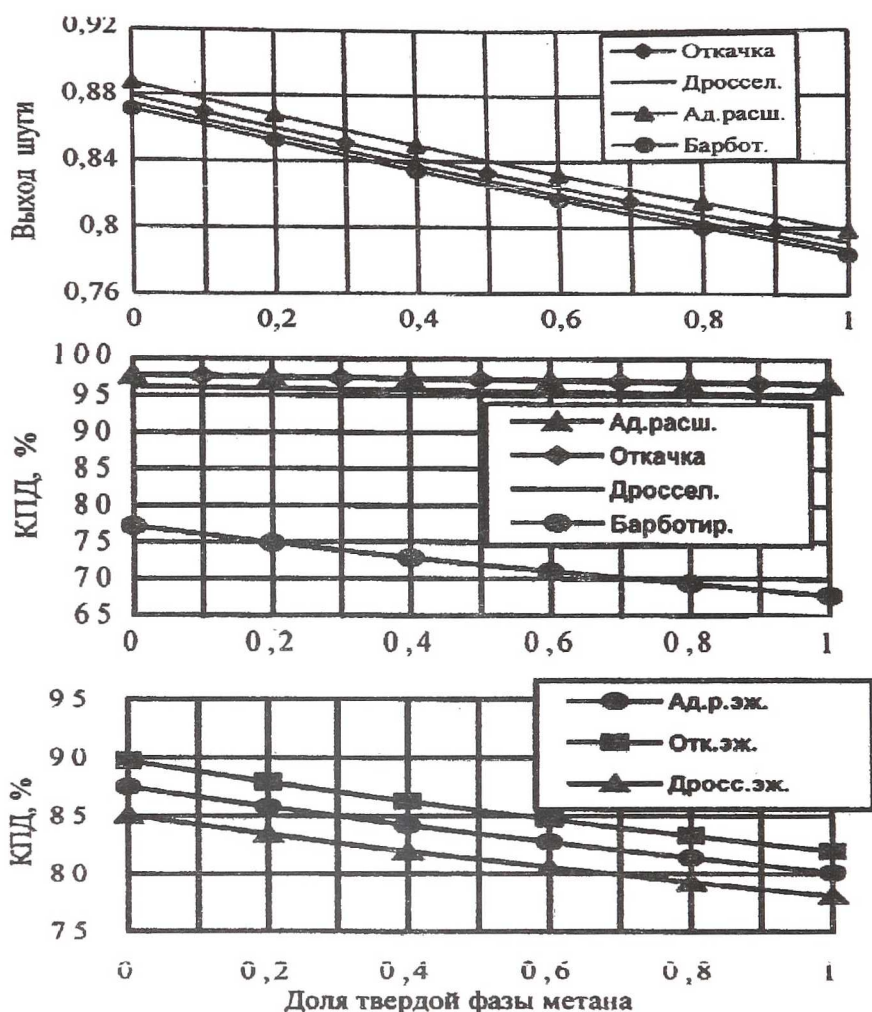


Рис. 1. Результаты расчета выхода метановой шуги при различных процессах в зависимости от доли твердой фазы метана

На рис. 4 и 5 приведены результаты расчетов процессов получения водородной шуги. Вариант с использованием эжектора не рассматривался, так как метан в данном случае конденсируется. Барботируемым газом был гелий.

Процессы получения шуги откачкой, дросселированием и адиабатным расширением по термодинамическому совершенству практически равнозначны. Наименьшие капитальные и эксплуатационные затраты ожидаются для процесса откачки, однако этот процесс пригоден в основном

для получения шуги непосредственно в емкости-хранилище и получаемая твердая фаза требует дополнительной обработки.

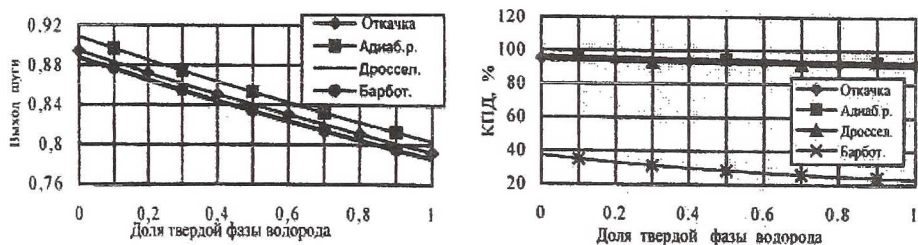


Рис. 2. Результаты расчета процессов получения водородной шуги

Наивыгоднейшим процессом является адиабатное расширение. В этом процессе получается мелкодисперсная шуга, не требующая дополнительной обработки, возможно организовать поточное производство.

Применение эжектора для поддержания вакуума снижает эксергетический КПД, но поскольку источник энергии для метанового эжектора практически даровой, использование эжектора более выгодно из-за низких капитальных и эксплуатационных расходов.

Получение шуги барботированием термодинамически и экономически невыгодно из-за высоких эксергетических затрат и высокой стоимости единицы эксергии барботируемого газа. В особенности это относится к процессу получения водородной шуги, так как в этом случае требуется большое количество гелия ($\approx 5,2$ кг на 1 кг 50%-ной шуги), а физическая и химическая эксергия гелия значительно выше соответствующих значений для азота.

Список литературы

1. Бродянский В.М. и Семенов А.М. Термодинамические основы криогенной техники.- М.: Энергия, 1980.- 448 с.
2. Арсланова С.Н., Тонконог В.Г. Охлаждение низкокипящих жидкостей и получение шугообразных сред. // Изв. РАН. Сер.Энергетика, №3, 2001. С.89 - 91.
3. Тонконог В.Г., Арсланова С.Н. Способ охлаждения потока жидкости и устройство для его осуществления. Авт. свид. СССР № 1815544, заявл. 16.04.90, опубл.15.05.93.
4. Петухов И.И., Шахов Ю.В., Сырый В.Н., Куриленко А.А. Способ получения шуги криогенной жидкости и струйный генератор шуги криогенной жидкости. Авт. свид. СССР № 1779761, заявл.23.04.90, опубл. 07.12.92.
5. Филин Н.В., Буланов А.Б. Жидкостные криогенные системы.- Л.: Машиностроение, 1985.- 247 с.